

# Study on migration and transformation of emerging pollutants in water environment and control technology

Xiaozheng Li

Dalian Detai Water Environment Co., Ltd., Dongfeng, Jilin, 116600, China

## Abstract

With the acceleration of industrialization and urbanization, the accumulation of emerging pollutants in aquatic environments and their ecological and health risks have increasingly drawn attention. This paper reviews the migration and transformation patterns of typical emerging pollutants such as pharmaceutical residues, personal care products, endocrine disruptors, and microplastics in water systems. It analyzes their distribution and key processes including adsorption, degradation, and bioaccumulation at the water-deposition-bio interface, summarizing relevant influencing mechanisms. Drawing on the latest domestic and international research, this review focuses on evaluating the effectiveness and limitations of physical, chemical, and biological control technologies in various water bodies and complex environments. The study emphasizes that precise analysis of pollutant migration pathways and transformation products, combined with the development of a multi-dimensional synergistic control technology system, is crucial for enhancing water environmental safety and risk prevention capabilities. Finally, it outlines future research directions to provide theoretical and technical support for emerging pollutant management and watershed ecological protection.

## Keywords

emerging pollutants; water environment; migration and transformation; control technology; risk prevention and control

# 水环境中新兴污染物的迁移转化规律及控制技术研究

李晓征

大连德泰水务环境有限公司, 中国 · 吉林 东丰 116600

## 摘要

随着工业化与城市化进程加速, 新兴污染物在水环境中的累积及其生态与健康风险日益引发关注。本文梳理了医药残留、个人护理品、内分泌干扰物、微塑料等典型新兴污染物在水环境中的迁移转化规律, 分析其在水-沉积物-生物界面的分布及吸附、降解、生物富集等关键过程, 总结了相关影响机制。结合最新国内外研究, 重点评述了物理、化学和生物控制技术在不同水体和复杂环境中的应用成效及局限。研究认为, 精准解析污染物迁移路径与转化产物、构建多元协同的控制技术体系, 是提升水环境安全与风险防控水平的核心。最后, 展望了未来研究方向, 为新兴污染物治理和流域生态保护提供理论与技术支撑。

## 关键词

新兴污染物; 水环境; 迁移转化; 控制技术; 风险防控

## 1 引言

近年来, 抗生素、激素、个人护理品、农药残留、微塑料等新兴污染物因在城市废水、工业排放及农业面源中的广泛存在, 逐步成为水环境领域关注的研究热点。这类污染物分子结构复杂、来源多样、环境行为独特, 难以被传统水处理工艺有效去除, 具有低浓度、高毒性、易富集、迁移距离远等特征。新兴污染物在水体中迁移转化过程受理化性质、水体理化参数、生物活动及人类活动影响, 导致其分布与归趋高度不确定。部分污染物经生物体吸收、食物链传递

后产生内分泌干扰、抗药性增强等生态与健康风险。因此, 系统揭示新兴污染物在水环境中的迁移转化机制, 开发高效、绿色、经济的控制与修复技术, 成为提升我国水生态环境质量和流域管理水平的关键。本文从新兴污染物的来源特征、迁移转化主导机制、主流控制技术及前沿方向等维度, 开展理论梳理与应用分析, 旨在为新兴污染物风险防控与水生态安全治理提供参考。

## 2 新兴污染物的类型与环境行为特征

### 2.1 新兴污染物的主要类型与来源

新兴污染物泛指近年来在环境监测与生态健康风险领域引发关注、但未被现行标准严格管控的有机和无机污染物。典型类型包括药物与抗生素残留、内分泌干扰物、个人

【作者简介】李晓征 (1987-), 中国吉林东丰人, 本科, 工程师, 从事无机化学及水处理研究。

护理用品、阻燃剂、塑化剂、农药及其降解产物、微塑料等。主要来源为城市污水处理厂尾水、医疗废水、畜禽养殖废水、农业面源和固废渗滤液等。由于生活方式变化和化工新材料的大量应用，相关污染物在环境中分布广、检出率高、成分复杂，极易进入江河湖库等水体，形成难以溯源和防控的环境问题。

## 2.2 理化性质与环境持久性

新兴污染物普遍具有低浓度高毒性、亲脂性强、易被生物吸附富集等特点。部分污染物如抗生素、雌激素等能在微量水平下干扰生物内分泌系统，影响生殖发育与种群健康。某些物质结构稳定、难降解，在环境中迁移距离远、持久性强。微塑料等新型颗粒污染物，因表面积大、吸附性能突出，常作为“污染物载体”促进重金属、有机污染物的迁移与生物摄入风险加剧。复杂的理化性质决定了其环境归趋、暴露风险及控制难度。

## 2.3 环境行为的空间异质性与生物效应

新兴污染物在水环境中的分布与迁移表现出显著的空间与时间异质性。这一分布格局不仅受水体理化参数如水温、pH、溶解氧等的影响，还与流域水动力条件（如流速、分层、沉积）和生物群落结构密切相关。外源输入（如城市污水、农业径流等）不断改变污染物的输入强度和类型，进一步加剧了其在不同介质间的迁移转化复杂性。在水—沉积物—生物界面，部分新兴污染物可通过吸附、解吸、降解、富集等过程不断迁移，并在食物链中逐级放大与转化，最终使二级消费者乃至人类面临潜在健康风险。此外，环境暴露风险不仅取决于单一污染物的毒性，还涉及复合污染下物质共存、相互作用、转化产物不确定性等多重协同效应，这增加了水环境风险识别与防控的难度，对污染物监测与生态健康保护提出了更高要求。

# 3 水环境中新兴污染物的迁移转化规律

## 3.1 吸附与解吸过程

新兴污染物在水环境中的迁移首要表现为吸附与解吸过程，尤以水—沉积物界面为核心。土壤颗粒、悬浮物和底泥因其多孔结构和巨大的比表面积，成为有机污染物的重要汇聚与缓释介质。吸附过程受污染物分子结构、极性、粒径及介质的有机质含量、粒径分布、pH等理化属性共同调控。部分新兴污染物如药物残留、农药、激素等，在沉积物中的吸附能力较强，形成环境暂存库。剧烈水动力扰动、高温、强光等条件下易诱发污染物解吸，致使沉积物中累积的污染物重新释放至水体，形成二次污染。近年来，研究表明微塑料作为“新型污染载体”，不仅自身迁移能力强，还能协同增强对药物残留、重金属等多种污染物的吸附与携带，显著改变传统污染物的环境行为与迁移路径，对环境风险评估提出了更高要求。

## 3.2 化学降解与生物转化

新兴污染物在水体中的迁移转化还高度依赖于化学降

解与生物转化过程。化学降解通常包括光解、水解和氧化还原等，受水体太阳辐射强度、溶解氧、有机质含量及温度等环境因素影响，决定了污染物的降解速率及其转化产物。部分污染物如内分泌干扰物、抗生素等在自然条件下降解缓慢，常形成中间产物甚至高毒性次生产物，加大了环境风险。生物转化是指微生物、藻类等水生生物通过吸收、代谢作用，将污染物结构转变为低毒或无毒物质。微生物降解是污水处理及天然水体自净的关键环节，不同微生物对污染物的专一性及降解效率差异明显。当前，化学—生物耦合处理策略被广泛研究与应用，有效提升了对复杂污染体系的去除能力，成为控制新兴污染物环境风险的重要方向。

## 3.3 生物富集与食物链传递

新兴污染物在水环境中还面临生物富集与食物链传递的生态风险。部分污染物因其亲脂性和环境持久性，易被水生生物如藻类、底栖动物、鱼类等吸收，在体内积累并逐级沿食物链传递，形成生物放大效应。典型如抗生素、雌激素、微塑料等，在水体各营养级间呈现明显的富集趋势。生物富集系数（BCF）和生物放大系数（BMF）成为评价其生态风险的重要定量指标。污染物的迁移与富集过程不仅受水体理化状态、生物代谢水平、摄食行为影响，还与生态系统结构及生物链关系密切相关。有效防控新兴污染物的链式扩散，需综合考量水环境动态性与生态过程的复杂性，加强多环节、多介质的协同治理与风险监测。

# 4 新兴污染物的检测、识别与迁移机制分析

## 4.1 检测技术与新型分析方法

新兴污染物因其种类繁多、结构复杂且环境浓度极低，对检测与分析技术提出了极高要求。主流分析方法包括液相色谱-质谱联用（LC-MS/MS）、气相色谱-质谱联用（GC-MS）、高效液相色谱（HPLC）、超高效色谱（UPLC）及同步辐射分析等。这些技术可实现对多种有机污染物、痕量药物残留及复杂降解产物的高灵敏、高分辨检测。近年来，痕量富集、免疫分析和纳米传感器等新兴技术不断成熟，大幅提升了超低浓度和复杂基质条件下的检测能力。多源数据融合技术，通过对多平台、多区域采集数据进行集成分析，提升了污染物溯源的精确性。分子标志物法和同位素示踪等新型手段，为污染物的迁移路径追踪和环境行为判别提供了可靠支撑，推动了新兴污染物研究由定性监测向定量机制解析转变。

## 4.2 分布规律与归趋判别

揭示新兴污染物在不同水环境介质中的分布规律，是理解其迁移行为与风险暴露的基础。通过空间高分辨率采样、组分谱图与多元统计分析，可以精细描述新兴污染物在地表水、地下水、雨洪径流及沉积物等环境介质中的时空分布特征。环境归趋研究综合水动力模拟、同位素示踪与定量风险评估方法，识别污染物迁移的主控因子、归趋趋势及高风险敏感区。例如，药物残留和内分泌干扰物在城市下游水

体中呈现富集,微塑料在水动力弱、颗粒物易沉积区域聚集。多环节动态监测与大数据分析可实时更新污染物分布态势,有助于快速锁定污染热点、环境敏感区及其变化趋势,为后续风险评估与防控策略优化提供科学数据支持。

#### 4.3 迁移转化机制的耦合效应

实际水环境中新兴污染物的迁移转化通常受到多种物理、化学和生物过程耦合作用。污染物在水—沉积物—生物三相界面可能经历吸附/解吸、溶解/再沉积、光化学降解、生物代谢等多过程联动,不同污染物及其降解产物的迁移速率、环境归趋与生物效应存在显著差异。例如,某些抗生素在强光照或高温下易光解,部分农药通过微生物作用转化为更易迁移的产物。多级食物链和复合污染环境进一步加剧了迁移机制的复杂性。科学揭示各过程的协同关系、主控环节及其调控机制,是提升风险评估、过程调控与治理技术研发水平的理论基础,对未来新兴污染物精准管控具有重要指导价值。

### 5 水环境中新兴污染物的控制技术

#### 5.1 物理拦截与强化分离技术

物理拦截与分离是当前新兴污染物控制的重要基础技术路径。膜分离工艺(如超滤、纳滤、反渗透)因其高效截留微量有机污染物、药物残留、微塑料等,在污水处理厂深度处理与饮用水源安全保障中获得广泛应用。膜法可通过筛分效应和分子排斥,针对性去除不同粒径、结构和极性的污染物。然而,膜材料长期运行易发生污染与堵塞,影响分离效率,并带来高能耗和膜浓缩液处理难题。吸附技术以活性炭、纳米材料、多孔陶瓷等为载体,通过表面作用或化学键合作用吸附污染物,其高效性和可再生利用特性使其在水厂、应急处置和流域治理中大放异彩。材料协同复合和功能化改性成为提升吸附性能的关键方向。多级组合工艺(如沉淀—吸附—膜分离)和移动式装备为水环境污染突发应急和流域多点布控提供了灵活高效的解决方案,有助于提升新兴污染物的广谱拦截与安全保障能力。

#### 5.2 化学氧化与高级氧化技术

化学氧化,尤其是高级氧化技术(AOPs),通过强氧化剂(臭氧、过氧化氢等)、紫外光照射、光催化等手段产生高活性自由基,实现新兴有机污染物的彻底分解与矿化。AOPs能够高效破坏分子结构,消除药物、农药、激素等持久性污染物,提升水体净化水平。在实际工程中,单一高级氧化法易受水体有机质干扰、能耗高、副产物生成等因素影响,需加强过程优化与风险评估。联合工艺(如Fenton反应与生物滤池、光催化与膜分离耦合)已成为提升去除效率

与控制副产物的有效途径。工程应用中还需关注氧化剂用量、反应条件控制与二次污染防控,推动技术集成与低碳高效发展。AOPs在复杂水体和多类型污染物协同去除中具有独特优势,是新兴污染物深度治理不可或缺的核心技术。

#### 5.3 生物修复与生态治理策略

生物修复与生态治理以生态友好和可持续为导向,成为新兴污染物治理的重要绿色技术。人工湿地系统利用高等植物、微生物、底泥等协同作用,有效吸收和降解药物、内分泌干扰物及部分难降解有机污染物,提升水体自净能力。微生物强化(菌剂投加、基因工程菌构建等)通过定向强化降解功能菌种,实现对特定污染物的高效生物降解。藻类处理、生态浮床和河道生态修复等方法,结合水动力调控和系统监测,可实现污染削减与生态修复的双重目标。当前,生物修复正向工程化、规模化与智能化发展,注重与水动力学、系统监测等技术协同集成,提升不同类型污染物在复杂环境下的控制效率和过程稳定性。生态治理在保障水生态健康、维护生物多样性和支撑流域可持续管理中展现出独特优势,是未来新兴污染物治理技术体系的重要组成部分。

### 6 结语

水环境中新兴污染物的迁移转化规律及其风险控制已成为生态环境领域的重要研究方向。当前,污染物类型日益多样,迁移过程高度复杂,治理难度不断上升。综合分析表明,精准识别污染物来源与迁移机制,是提升风险预警与防控能力的前提;多元协同的物理、化学、生物等控制技术集成应用,是提升治理效率与生态安全水平的关键。未来应加强多过程、多学科交叉融合研究,创新环境监测、智能感知与绿色修复技术,为新兴污染物的全过程管理和流域生态保护提供科学支撑和决策依据,助力我国水环境质量持续提升与生态文明建设目标实现。

### 参考文献

- [1] 潘子冬.新兴污染物对污水深度处理的生命周期评价结果不确定性的影响[D].哈尔滨工业大学,2022.
- [2] 李尚禹.基于分子特征和机器学习方法的新兴污染物性质预测研究[D].天津大学,2022.
- [3] 张梦阳.珠三角区域饮用水新兴污染物检测和处理技术[D].清华大学,2017.
- [4] 鲍金铭,王文亮,胡云霞.面向新兴污染物去除的纳滤膜研究进展[J].膜科学与技术,2024,44(06):169-177.
- [5] 吕琛山,曹艺璇,穆晓茜,等.地表水中34种新兴污染物的超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱快速筛查[J].法医学杂志,2024,40(01):30-36.